

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA OBRÁBĚNÍ, MONTÁŽE A STROJÍRENSKÉ
METROLOGIE

**Možnosti snižování opotřebení řezného nástroje při
hrubovacím soustružení**

**Options for Decreasing Tool Wear during Rough
Turning**

Student:

Tomáš Viktora

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Viktora**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Možnosti snižování opotřebení řezného nástroje při hrubovacím soustružení**
Options for Decreasing Tool Wear during Rough Turning
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor vzniku opotřebení VBD při soustružení.
2. Realizace experimentální části se zaměřením na stav břitu řezného nástroje.
3. Analýza opotřebení řezného nástroje při obrábění.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:


SADÍLEK, M., KRATOCHVÍL, J., PETRŮ, J., ČEP, R., ZLÁMAL, T., STANČEKOVÁ, D.
Cutting tool wear monitoring with the use of impedance layers [Nadzor trošenja reznog alata upotrebom otpornih slojeva. (2014) *Tehnicki Vjesnik*. 21 (3), pp. 639-644.
SADÍLEK, M.; ČEP, R.; SADÍLKOVÁ, Z.; VALÍČEK, J.; PETŘKOVSKÁ, L.
Increasing tool life during turning with variable depth of cut. Materiali in tehnologije/Materials and technology. 2013, vol.47, no.2, pp.199-203, ISSN:1580-2949.
AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Překl. M. Kudela. 1. vyd. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*. ISBN 91-972299-4-6.
SADÍLEK, M.; DUBSKÝ, J. *Obrábění I – Výběr přednášek*. 2015. VŠB – TU Ostrava, 137 s., ISBN 978-80-246-3857-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrá, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci, včetně všech příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020




.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že -podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů- že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....

Podpis autora práce

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VIKTORA, T. *Možnosti snižování opotřebení řezného nástroje při hrubovacím soustružení: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 50 s. Vedoucí práce: Sadílek, M.

Bakalářská práce je zaměřena na možnosti snižování opotřebení řezného nástroje při hrubovacím soustružení. V teoretické části práce jsou shrnuty informace o opotřebení řezných nástrojů, o metodách, kterými lze opotřebení měřit, a také jsou zmíněny parametry, které mají na opotřebení vliv. Experimentální část se zabývá možnostmi snížení opotřebení řezného nástroje. Byla provedena série měření opotřebení u 4 výměnných břitových destiček typu C. U dvou VBD probíhalo hrubování za konstantní hloubky řezu a rozdílné řezné rychlosti. U dalších dvou VBD bylo hrubování s proměnnou hloubkou řezu s vytvářením kuželové plochy a rozdílnou řeznou rychlostí. Opotřebení bylo vyhodnoceno pomocí stereomikroskopu.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

VIKTORA, T. *Possibilities of reducing cutting tool wear during rough turning: Bachelor thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 50 p. Thesis head: Sadílek, M.

The bachelor thesis is focused on the possibilities of reducing the wear of the cutting tool during rough turning. The theoretical part of the work summarizes information about the wear of cutting tools, the methods by which wear can be measured, and also mentions the parameters that affect the wear. The experimental part deals with the possibilities of reducing the wear of the cutting tool. A series of wear measurements was performed on 4 replaceable inserts of type C. For two replaceable inserts, roughing was performed at a constant depth of cut and different cutting speeds. For the other two replaceable inserts, roughing was of variable depth of cut with conical surface formation and different cutting speeds. Wear was evaluated using a stereomicroscope.

Obsah

Seznam zkratk	8
1 ÚVOD	10
2 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE	11
2.1 Podstata opotřebení	11
2.2 Klasifikace typů opotřebení	13
2.2.1 Opotřebení hřbetu bříty	14
2.2.2 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele bříty	14
2.2.3 Vydrolení ostří	15
2.2.4 Plastická deformace bříty	15
2.2.5 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě bříty	16
2.2.6 Tvoření nárůstku	16
2.2.7 Vznik hřebenovitých trhlin na ostří	17
2.2.8 Únavový lom	18
2.2.9 Lom bříty nástroje	18
2.3 Kritéria opotřebení	19
2.4 Měření opotřebení	20
2.4.1 Přímé metody	20
2.4.2 Nepřímé metody	23
3 TECHNOLOGICKÉ VLIVY NA OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE	26
3.1 Řezné podmínky	26
3.2 Obrobitelnost materiálu	26
3.3 Geometrie nástroje	27
3.4 Teplota řezání	28
3.5 Řezné prostředí	29
4 MOŽNOSTI SNIŽOVÁNÍ OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE	30
4.1 Hrubování se snižováním hloubky řezu	30
4.2 Hrubování s vytvářením kuželové plochy	30
4.3 Hrubování s nelineární hloubkou řezu	31
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
5.1 Použitý materiál	32
5.2 Obráběcí stroj	33
5.3 Měření opotřebení	33
5.4 Použitý řezný nástroj	34
5.5 Postup testování VBD	35
5.6 Opotřebení testovaných VBD	36

5.7	Vyhodnocení opotřebení VBD	42
6	Závěr	44
7	Seznam použité literatury.....	46
8	Seznam obrázků	49
9	Seznam tabulek	50

Seznam zkratek

ČSN	Česká státní norma	[-]
ISO	Mezinárodní organizace pro normy	[-]
	(International Organization for Standardization)	[-]
AISI	American Iron and Steel Institute	[-]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	[-]
PVD	Povlakování fyzikální metodou	[-]
	(Physical Vapour Deposition)	[-]
dest.	Destrukce VBD	[-]
VB	Opotřebení na hřbetě	[mm]
VB _{max}	Maximální opotřebení	[mm]
KT	Hloubka žlábků	[mm]
VB _{opt}	Optimální opotřebení	[mm]
R _p	Mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
A	Tažnost	[%]
v _c	Řezná rychlost	[m/min]
f _{ot}	Posuv na otáčku	[mm/ot]
a _p	Hloubka řezu	[mm]
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	[-]
C	Uhlík	[-]
Cr	Chrom	[-]
Mn	Mangan	[-]
Mo	Molybden	[-]
N	Dusík	[-]
Ni	Nikl	[-]

S	Síra	[-]
Si	Křemík	[-]
P	Fosfor	[-]
Fe	Železo	[-]

1 ÚVOD

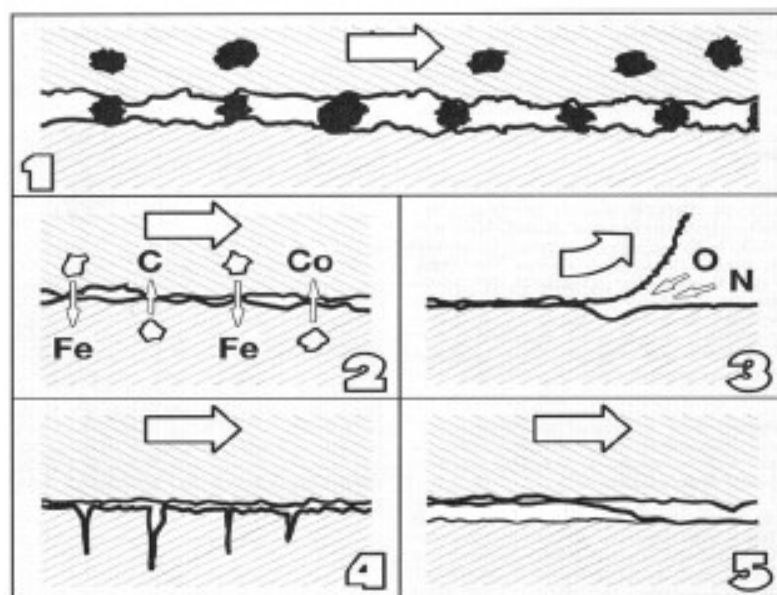
Opotřebení je běžným důsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu. Jedním z hlavních kritérií charakterizujících trvanlivost VBD je opotřebení na hřbetě břitů, které patří mezi nejčastější způsob opotřebení. Pokud se opotřebení zvětšuje stejnoměrně, je to často považováno za ideální stav. Příliš velké opotřebení má však za následek zhoršení jakosti obrobeného povrchu a nepřesnost rozměrů. Pro vyhodnocení opotřebení se používají metody přímé a nepřímé. Přímé metody určují hodnotu opotřebení vybraného kritéria přímo, ale jsou na rozdíl od nepřímých hůře aplikovatelné a při měření musí být proces obrábění vždy přerušeno. Nepřímé metody se provádí přímo při procesu řezání. Jsou ale pouze přibližné a stanovují hodnotu opotřebení na základě dat naměřených snímačem. S opotřebením nástroje jsou spojeny různé parametry, které ho ovlivňují. Mezi hlavní z nich patří rezná rychlost, rychlost posuvu a hloubka řezu.

Cílem experimentu je navrhnout možnosti snižování opotřebení při hrubovacím soustružení zvolených VBD. Jako obráběný materiál je použita nerezová austenitická chromo-niklová molybdenová ocel (1.4404), která má při obrábění tendenci ke zpevňování za studena. Pro měření jsou zvoleny dvě strategie hrubovacího soustružení, a to hrubování za konstantní hloubky řezu a proměnné hloubky řezu s vytvářením kuželové plochy. U obou typů hrubovacího procesu byly použity zvýšené rezné rychlosti.

2 OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE

2.1 Podstata opotřebení

Opotřebení je běžným důsledkem funkce všech strojních součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu a relativním pohybu. Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu k relativnímu pohybu nástroj-obrobek a nástroj-tříška, ale také ke kontaktu nástroje s obrobkem a odcházející třískou, což vede k opotřebení nástroje. Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech, jako jsou například fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní podmínky, řezné prostředí [1]. Kombinací těchto faktorů dochází ke složitému zatěžování břitu nástroje, což se projevuje opotřebováním nástroje. K základním mechanizmům opotřebení (obr. 1) patří zejména abraze, adheze, difúze, oxidace, plastická deformace a křehký lom [2].



Obrázek 1 – Mechanismy opotřebení: 1 – abraze, 2 – difúze, 3 – oxidace, 4 – křehký lom, 5 – adheze [2]

Abraze a adheze jsou obvykle označovány jako fyzikální mechanismy opotřebení, difúze a oxidace jako chemické mechanismy opotřebení, přičemž všechny působí v průběhu času plynule, s tím, že časový okamžik začátku jejich působení nemusí být vždy shodný. Naproti tomu plastická deformace a křehký lom jsou mechanismy s náhlým nástupem v daném okamžiku a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje. V důsledku abraze a oxidace se opotřebává především

hřbet nástroje, čelo pak v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Výrazný vliv na opotřebení nástroje na hřbetě, na čele a na špičce mají i další faktory, jako jsou například geometrie nástroje, druh operace, ale i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří, řezné prostředí) [1].

Abrazivní opotřebení je charakteristické oddělováním částic z funkčního povrchu působením tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa. Oddělené částice se nazývají abrazivní. Pokud abrazivní částice vniknou mezi dvě pohybující se tělesa, opotřebení se projeví vznikem rýh na povrchu funkční plochy. V praxi se abrazivní opotřebení projevuje například opotřebením zubů lžice rypadel, vznikem rýh na pístu a pouzdru válce spalovacího motoru nebo zmenšením tloušťky stěny potrubí dopravující písek. Velikost opotřebení je závislá na poměru tvrdosti funkční plochy a abrazivní částice. Obecně platí, že čím tvrdší je abrazivo, tím měkčí musí být povrch funkční plochy a opačně. Velmi se osvědčilo použití měkčených plastů jako ochranného povlaku potrubí pro dopravu písku [3].

Adhezní opotřebení se projevuje vznikem mikrosvarových spojů na stýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky. Dochází k tomu v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů [2]. Vznik mikrospojů je doprovázen lokálním ohřevem materiálů čímž vzniká vhodné prostředí pro chemickou reakci kovu s okolním prostředím, která může dále zvýšit rychlost opotřebení. V praxi se adhezní opotřebení vyskytuje například při kontaktu kolo – kolejnice, kluzná ložiska, čepy. Velikost opotřebení je závislá na zatížení kontaktní dvojice, volbě materiálů nebo opracování funkčních povrchů. Opotřebení lze snížit vhodným mazáním funkčních povrchů [3].

Difúzní opotřebení vzniká při dosažení určité teploty stykových míst. Při tomto typu opotřebení dochází k migraci atomů z obráběného do nástrojového materiálu a naopak [2]. V důsledku toho se mění chemické složení povrchových vrstev stýkajících se materiálů a vznikají tak nové vrstvy o novém chemickém složení [4].

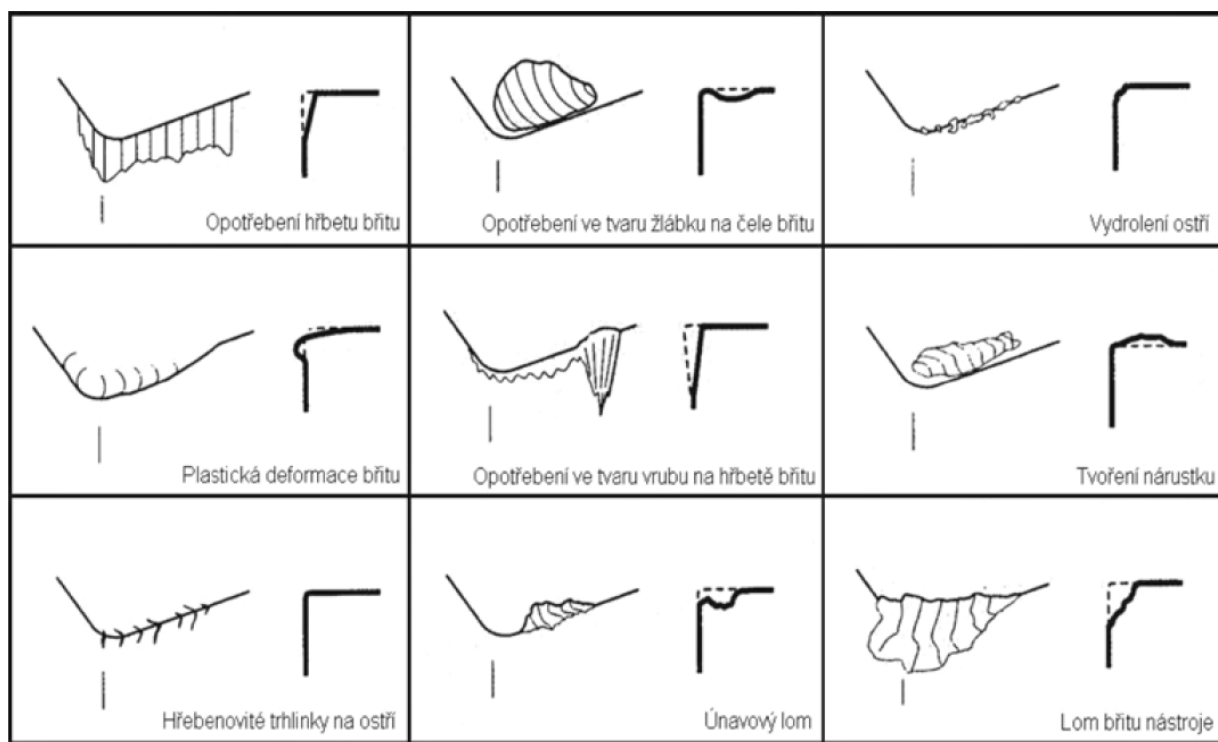
Oxidační opotřebení je z chemického hlediska podobné difúznímu, protože i tady vznikají vrstvy o novém chemickém složení, avšak už při nižších teplotách, než je nejnižší teplota difúze [4]. Při oxidačním opotřebení dochází ke vzniku chemických sloučenin na povrchu nástroje v důsledku přítomnosti kyslíku v okolním prostředí.

Plastická deformace se vyskytuje při obrábění po dosažení určité limitní teploty v některém místě stykových ploch mezi nástrojem a obrobkem [4]. Je důsledkem vysokého tepelného a mechanického zatížení kumulovaného v čase, které se může projevit ve formě tzv. lavinového opotřebení [2]. Podstatou deformace je kontinuální přesun velmi tenké povrchové vrstvičky materiálu bříty v plastickém stavu z povrchu nástroje. Dochází k prudkému poklesu tvrdosti řezného materiálu, který je rychle opotřebován obrobkem [4].

Ke **křehkému lomu** dochází při napětí menším, než je mez kluzu. Vzniká při vysokém mechanickém zatížení, které je způsobeno např. přerušovaným řezem, nehomogenitami a vměstky v obráběném materiálu. Při lomu dojde k porušení součásti v celém jejím průřezu, který se uskutečňuje vznikem a šířením trhlin [5].

2.2 Klasifikace typů opotřebení

Z hlediska technologických podmínek řezného procesu byly klasifikovány různé typy opotřebení bříty nástroje (obrázek 2).



Obrázek 2 – Klasifikace typů opotřebení [2]

2.2.1 Opotřebení hřbetu břitů

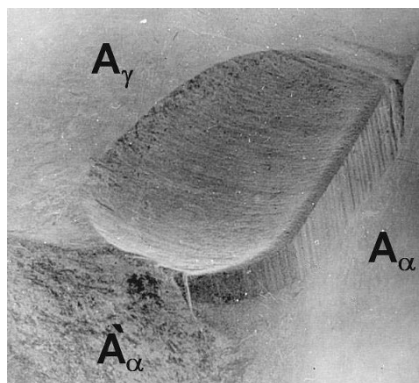
Opotřebení hřbetu břitů je jedním z hlavních typů opotřebení charakterizující trvanlivost VBD [6]. Patří mezi abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše břitů [2]. Jedná se o nejčastější způsob opotřebení, jelikož umožňuje dosažení předvídatelné a stabilní životnosti nástroje [7]. Pokud se opotřebení zvětšuje stejnoměrně, je to často považováno za ideální stav. Avšak příliš velké opotřebení má za následek zhoršení jakosti obrobeného povrchu, nepřesnost rozměrů a narůstání tření, které vzniká změnou geometrie břitů [2]. Jeho intenzitu lze pouze snížit, a to například použitím otěruvzdornějšího typu slinutého karbidu, zvýšením intenzity chlazení nebo snížením řezné rychlosti [6].



Obrázek 3 – Opotřebení na hřbetu nástroje [2]

2.2.2 Opotřebení ve tvaru žlábků na čele břitů

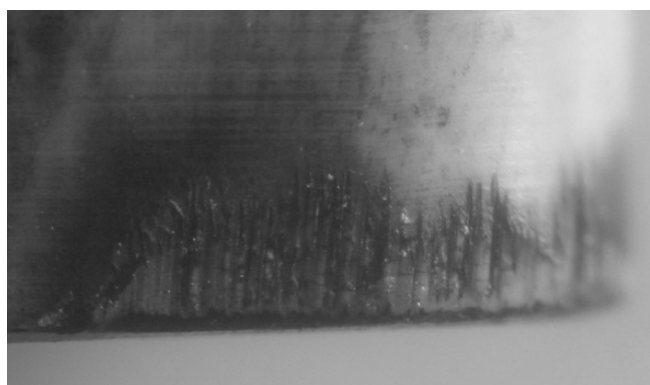
Opotřebení ve tvaru žlábků na čele břitů se nejvýrazněji projevuje u VBD s rovným čelem. K opotřebení dochází působením difúze a abraze. Dochází k chemické reakci v místě mezi třískou a materiálem břitů, přičemž se účinek opotřebení zesiluje s rostoucí řeznou rychlostí. Nadměrné opotřebení zeslabuje břit a může vést až k jeho lomu. Snížit vznik tohoto opotřebení lze například použitím materiálů s malou afinitou [7, 2, 6].



Obrázek 4 – Opotřebení ve tvaru žlábků [2]

2.2.3 Vydrolení ostří

Při tomto typu opotřebení se břit neopotřebovává stejnoměrně, nýbrž se vydroluje. Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení a vede k oddělování drobných částeczek řezného nástrojového materiálu z povrchu břitu [6]. K vydrolování ostří nejčastěji dochází při obrábění přerušovaným řezem. Odlupování materiálu a trhliny značí možnost lomu břitu. Vydrolování může být také způsobeno nevhodnou volbou řezného materiálu nebo ostří [2].

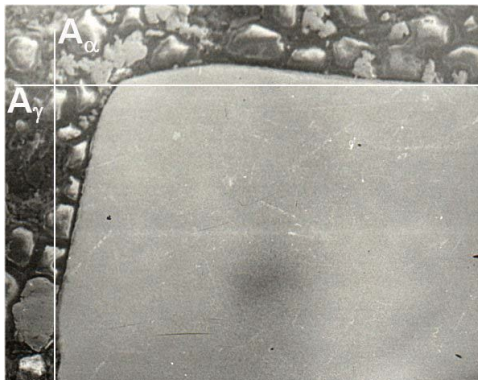


Obrázek 5 – Vydrolení ostří nástroje [2]

2.2.4 Plastická deformace břitu

Plastická deformace se projevuje v okamžiku, kdy dochází ke změknutí nástrojového materiálu vlivem vysoké teploty a řezných tlaků na břitu. Ty jsou vyvolány vysokými řeznými rychlostmi a tvrdými materiály obrobků. U materiálu, který je vůči těmto zatížením odolný a plasticky se nedeformuje, je tvrdost za tepla rozhodujícím faktorem. Deformace břitu teploty ještě více zvyšuje a může dojít až ke

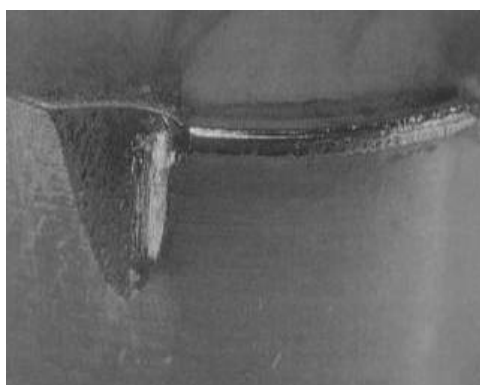
změně geometrie bříty nástroje [6, 8]. Plastické deformaci lze předejít použitím VBD s větším poloměrem zaoblení špičky nebo VBD s větším úhlem špičky [9].



Obrázek 6 – Plastická deformace bříty [2]

2.2.5 Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě bříty

Patří k typickým adhezním opotřebením, ale může souviset i s oxidačním opotřebením. Vrubu vznikají v místě kontaktu bříty s bokem třísky. Toto opotřebení je omezeno přesně na místo, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění. Příčinou opotřebení jsou tvrdé částice materiálu obrobku. Příliš velké opotřebení ovlivňuje utváření třísky a může vést až k lomu destičky [9]. Toto opotřebení často vzniká při obrábění korozivzdorných ocelí a lze ho snížit například použitím VBD s povlakem obsahující Al_2O_3 [6].



Obrázek 7 – Opotřebení ve tvaru vrubu [2]

2.2.6 Tvoření nárůstku

Hlavním důvodem vzniku tohoto typu opotřebení je adheze materiálu. Nárůstek vzniká na bříty zejména působením vysokého tlaku a k jeho vzniku dochází hlavně tam, kde je zvýšená chemická afinita, vysoký tlak a dostatečná teplota v zóně řezu. Dále pak

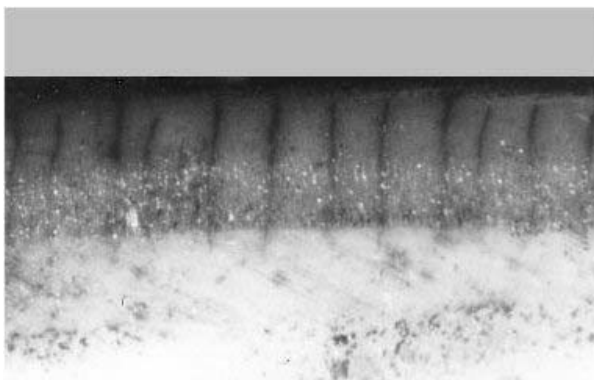
dochází k odlomení nárůstku, který s sebou unáší i částice materiálu břitové destičky, což má za následek vyštipování ostří a rychlejší opotřebení hřbetu. Důsledkem tohoto opotřebení je zhoršení rozměrové přesnosti a kvality povrchu obrobku. Nárůstek vzniká zejména u měkkých materiálů, neželezných kovů, vysokoteplotních slitin a nerezové oceli. Projevuje se spíše při nízkých řezných rychlostech frézovacích a vrtacích operací. Tvorbu nárůstku lze eliminovat například použitím povlaku na břitové destičce nebo použitím destičky s ostřejší řeznou geometrií a hladší leštěnou plochou [8].



Obrázek 8 – Tvorba nárůstku na hřbetě [2]

2.2.7 Vznik hřebenovitých trhlin na ostří

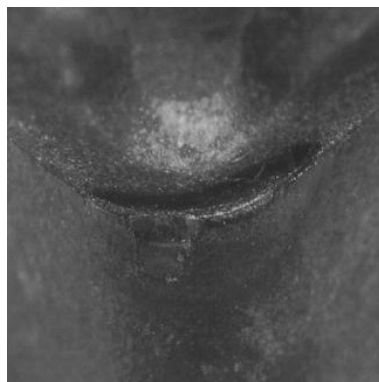
Vznik hřebenových trhlinek na ostří představuje formu únavového opotřebení, které je způsobeno tepelným šokem. K tomuto druhu opotřebení často vede změna teplot [10]. Trhliny se tvoří kolmo na ostří, mezi nimi se mohou vylamovat částice řezného nástrojového materiálu a vyvolat až lom břitu. Pokud se změní tloušťka třísky, změní se i teplota. Zde se nedoporučuje použití chladicí kapaliny, aby nedošlo ke zvýšení teplotních rozdílů při záběru břitu do materiálu obrobku a při výstupu z něj [6].



Obrázek 9 – Vznik hřebenovitých trhlin [10]

2.2.8 Únavový lom

Únavový lom je následkem velkých změn řezných sil. Tento druh lomu vzniká vlivem součtu neustále se měnících různých zatížení, které nejsou samy o sobě dost velké, aby lom způsobily. Způsob jakým je nástroj vřezáván do materiálu obrobku a změna velikosti a směru působení řezné síly mohou být pro pevnost a houževnatost VBD příliš náročné [10].



Obrázek 10 – Únavový lom [10]

2.2.9 Lom břitů nástroje

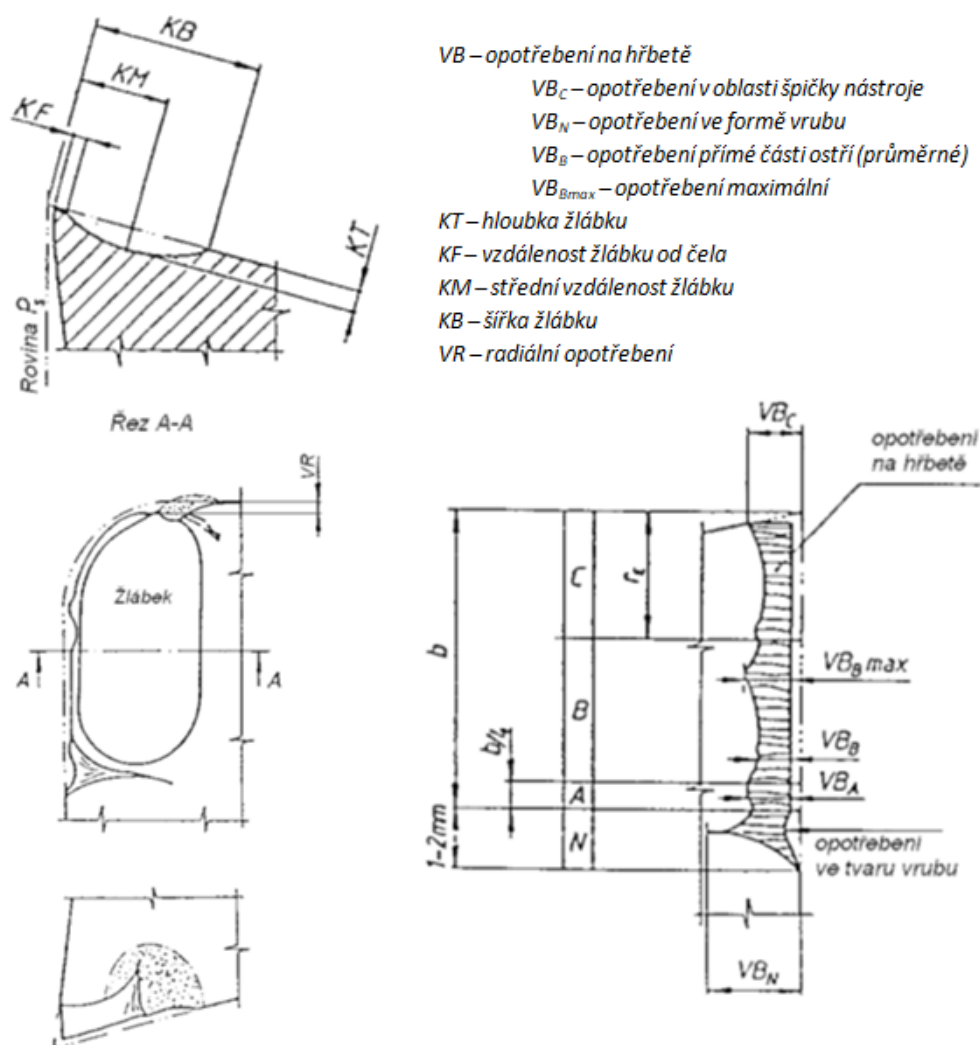
Lom břitů nástroje představuje konec funkčnosti řezného nástroje. Je způsoben přetížením břitu mechanickým tahovým namáháním. Taková namáhání mohou vznikát v důsledku příliš vysoké hodnoty posuvu nebo hloubky řezu, zasekávání třísek, vměstků písku obsažených v materiálu obrobku, vibrací, tvorby nárůstku nebo nadměrného opotřebení břitové destičky. Lom může být způsoben také nevhodnou volbou materiálu břitu. Materiál musí být dostatečně houževnatý, aby zvládl požadavky na obrábění [7, 10].



Obrázek 11 – Lom břitů nástroje [2]

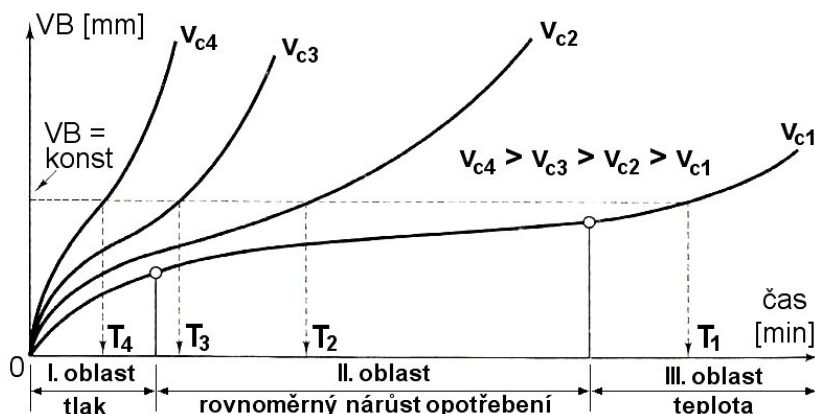
2.3 Kritéria opotřebení

Nejpoužívanější metodou pro hodnocení opotřebení jsou kritéria opotřebení. Nejčastěji užívaná kritéria, kterými je kvantifikováno opotřebení jsou **VB** – opotřebení na hřbetě a **KT** – hloubka žlábků na čele. Dalším praktickým kritériem opotřebení, které může při řezných podmínkách rozhodovat o trvanlivosti břitů je prolomení žlábků na čele do vedlejšího ostří v oblasti sekundární hřbetní rýhy. Toto kritérium je rozhodující zejména z hlediska posuzování struktury obrobeného povrchu, protože znamená výrazné zhoršení parametrů drsnosti [11]. Před testováním opotřebení je důležité stanovit maximální hodnotu opotřebení **VB_{max}**, což je maximální hodnota šířky žlábků na hřbetě nástroje. Pokud je tato hodnota překročena, nástroj je považován za opotřebovaný [12].



Obrázek 12 – Formy opotřebení dle ISO 3685 [2]

Časový průběh opotřebení je uveden na obrázku 13. Rychlý nárůst hodnoty VB v oblasti I je způsoben velkým měrným tlakem, který působí na styku hřbetu nástroje s přechodovou plochou obrobku v důsledku velmi malé stykové plochy. V oblasti II hodnota VB narůstá rovnoměrně v důsledku působení základních mechanismů opotřebení, v oblasti III nakumulované tepelné zatížení nástroje znamená výrazné zvýšení intenzity opotřebení [11].



Obrázek 13 – Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti (křivka pro nejmenší řeznou rychlost v_{c1}) [11]

2.4 Měření opotřebení

Metody, kterými lze stanovit opotřebení řezného nástroje se dělí na přímé a nepřímé.

2.4.1 Přímé metody

Přímé metody určují přímo hodnotu opotřebení. Jsou však těžko aplikovatelné kvůli špatné přístupnosti měřicích přístrojů k otupující se ploše. Pro měření musí být proces obrábění vždy přerušen, což může ovlivnit charakter otupení v dalších etapách experimentu. Ve většině případů se nástroj snímá z nožového držáku, což způsobuje změny podmínek obrábění při dalším upnutí a ustavení. Nejjednodušším způsobem je měření opotřebení při broušení, kdy lze stanovit úbytek brusného kotouče tak, že je změřena vzdálenost obrobené plochy od osy kotouče [1, 2, 10].

Metoda váhová

Při této metodě je jako míra opotřebení brán úbytek hmotnosti řezného břitů. Tuto metodu nelze aplikovat přímo během procesu obrábění, ale až po přerušení nebo

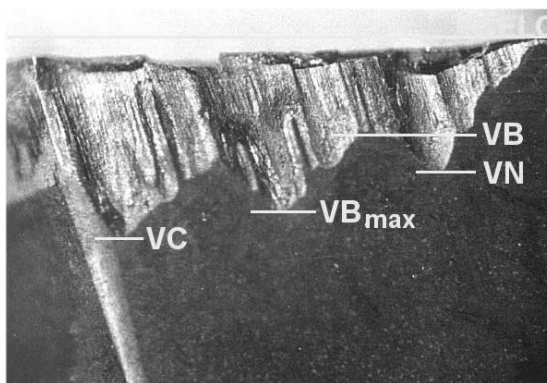
skončení procesu. Tato metoda je poměrně přesná. Nevýhodou je vznik nárůstku při obrábění, který ulpívá na destičce a znehodnocuje tak přesné výsledky měření hmotnostního úbytku na nástroji [1, 2, 10].

Metoda radioaktivních izotopů

Metoda radioaktivních izotopů je nejcitlivější a nejpresnější metodou určování váhového úbytku destičky v závislosti na čase. Umožňuje určit váhové úbytky v řádech 10 – 3 mg. Největší část opotřebovaného materiálu nástroje odchází třískou a jen velmi malé množství opotřebovaného materiálu zůstává na obrobené a neobrobené ploše. Materiál nástroje je radioaktivním článkem. Aktivaci nástroje lze dosáhnout dvěma způsoby, kdy prvním z nich je zavedení radioizotopu již při hutnickém procesu. Tímto způsobem lze přesně stanovit aktivitu nástrojového materiálu v závislosti na průběhu času. Druhý způsob spočívá v ozáření hotového nástroje proudem neutronů. K ozáření dochází v reaktoru, kde vzniká směs radioizotopových prvků. Odebere se stanovené množství třísek aktivním nástrojem. Následně se z obrobené a neobrobené vrstvy plochy řezu odebere tenká vrstva neaktivním nástrojem. Oba vzorky jsou vloženy do měřicího zařízení. Měření probíhá vždy za daných řezných podmínek. Na základě aktivity třísek, která je dána počtem impulzů za minutu, lze stanovit množství nástrojového materiálu [1, 2, 10].

Metoda mikrometrická

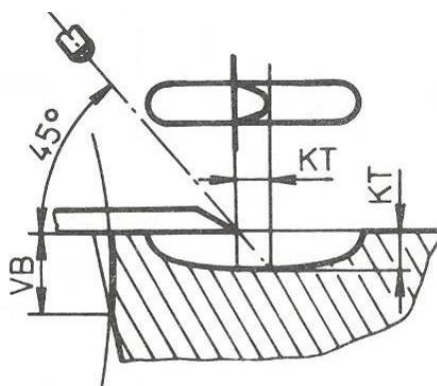
Při mikrometrické metodě je velikost opotřebení určována měřením lineárních rozměrů. Pro měření se nejčastěji používají dílenské mikroskopy s křížovým stolem. Hloubka žlábků je měřena číselníkovými úchylkoměry a komparátory (obrázek 14). Tato metoda je nejčastěji využívána v praxi, ale nelze ji použít přímo při procesu obrábění. Existují ale programy, které mohou vyhodnocovat velikost opotřebení přímo na mikroskopu. Před samotným měřením je nutné kalibrovat optiku na definované zvětšení. Samotné měření spočívá v zaznamenávání kót do obrazu, který je následně uložen. Ze získaných snímků je poté vyhodnocováno opotřebení nástroje. Existují i 3D souřadnicové stroje, které jsou schopny vytvořit reálný obraz. Na základě údajů je možné vytvořit charakteristickou mapu opotřebení a z ní odečíst parametry opotřebení [10].



Obrázek 14 – Příklad opotřebení na hřbetě nástroje [2]

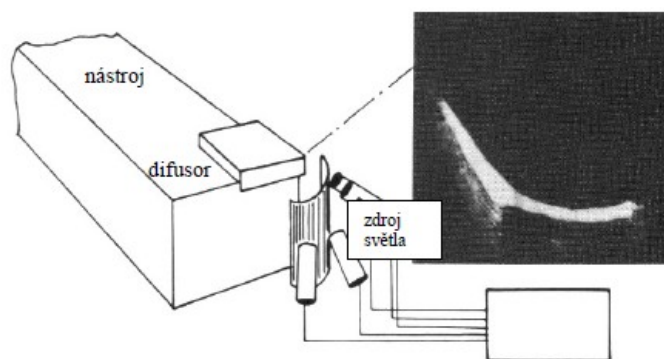
Metoda optická

Metoda optická nebo také metoda stínová slouží k měření hloubky žlábků. Na čelo je umístěna ostrá hrana, která je osvětlena paprskem světla pod úhlem 45° , hloubka opotřebení je pak určena ze vzdálenosti tečny ke stínu (obrázek 15) [2].



Obrázek 15 – Schéma měření optickou metodou [2]

Dalším typem je metoda založená na měření opotřebení na čele nástroje. Difusorem je na čele nástroje vytvořena charakteristická mřížka, která je snímána kamerou. Mřížka je deformována v souvislosti s vytvářením kráteru na čele nástroje (obrázek 16). Na základě dat z kamery je možné vytvořit reálný trojrozměrný obraz opotřebení čela nástroje [10].



Obrázek 16 – Osvětlení čela nástroje [10]

Metoda nanesení odporové vrstvy

Metoda nanesení odporové vrstvy je další z přímých metod měření opotřebení. Opotřebení nástroje je měřeno na základě změny odporu v místě kontaktu nástroje s obrobkem pomocí odporového snímače. Jedná se v podstatě o vytvoření odporového obvodu na hřbetu nástroje. Nevýhodou této metody je ovlivnění snímače odchodem třísky, změnou teploty a chladicí kapalinou [10].

Metoda pneumatická

Spolehlivou a konstrukčně jednoduchou metodou je také pneumatická metoda. Spočívá v měření úbytku vyměnitelné břitové destičky v kolmém nebo radiálním směru k ploše řezu [10].

2.4.2 Nepřímé metody

Nepřímé metody se provádí během procesu řezání. Všechny jsou pouze přibližné a stanovují hodnotu opotřebení na základě dat naměřených určitým snímačem [2].

Optické metody

Metoda založená na odrazu světla využívá paprsek světla, který dopadá na ostří nástroje. Charakter odraženého světla pak závisí na stavu opotřebení povrchu nástroje. Tato metoda je jednoduchá a používá se u frézování a broušení. Metoda využívající televizní kamery se používá hlavně při soustružení. Nástroj je po pracovním cyklu umístěn před televizní kameru do testovací polohy. Je postupně osvětlen ze 4 stran pod různými úhly, což následně umožní vytvořit 3D obraz opotřebení. Pomocí mikroprocesorů je sejmutý obraz analyzován. Skutečné rozměry opotřebení jsou vypočteny z odlesků a stínů [10].

Měření pomoci síly řezání a krouticího momentu

S rostoucí velikostí opotřebení roste obvykle i řezný odpor. Podstatou měření složek řezné síly a krouticího momentu je měření deformací vzniklých v soustavě stroj – nástroj – obrobek. Velikost řezné síly i krouticího momentu lze změřit pomocí dynamometru. Pro měření osové síly se používají tenzometry, které jsou umístěné na ložiskách posuvových šroubů. Metoda je použitelná při soustružení nebo vrtání. Výsledky získané touto metodou jsou pouze orientační a slouží spíše k určení kritického opotřebení nástroje [10].

Měření detekcí mezery mezi nástrojem a obrobkem

Je založeno na změně vzdálenosti mezi obráběným povrchem a bodem na nástroji. U dotykové metody se využívá mechanického kontaktu s obráběným povrchem a měření se provádí pomocí elektrického mikrometru. Důsledkem zvětšujícího se opotřebení je přemísťování dotyku, čímž jsou získávány údaje o opotřebení. Lze použít také měření využívající vířivých proudů, kde je kontakt pro mechanický dotyk vyroben z karbidu wolframu kvůli vysoké otěruvzdornosti. Mezi bezkontaktní způsoby se řadí pneumatická metoda, kde se využívá pneumatického snímače. Ten měří vzdálenost mezi tryskou a obráběným povrchem. Dále pak metoda optického a ultrazvukového mikrometru. U optického mikrometru měření spočívá v působení paprsku laseru zaměřeného na obrobený povrch pod určitým úhlem a jeho odraz je zachycen fotodetektorem. Naměřená změna úhlu oproti nastavenému je proporcionálem opotřebení nástroje. U ultrazvukového mikrometru se využívá ultrazvukového pulzu vyslaného z vysílače a jeho časový průběh. Pulz je poté odražen od obráběného povrchu a registrován přijímačem. Při kapacitní metodě se vkládá mezi obrobek a nástroj kovová destička. Po přivedení jednosměrného napětí dojde k vytvoření kondenzátoru s konstantní kapacitou. Opotřebení se určuje podle změny kapacity, která se mění v závislosti na změně rozměru obrobku [10].

Měření prostřednictvím vibrací

Tato metoda je kvůli velké citlivosti na okolní prostředí prováděna pouze laboratorně. Měření lze provádět například pomocí piezoelektrického akcelerometru. Ten snímá vibrace a samobuzené kmitání. Po změření vertikálních vibrací lze z amplitudy určit limitní opotřebení nástroje. Nevýhodou této metody je ovlivnění měření okolními vibracemi a hlukem. Opotřebení je možné měřit také pomocí kyvadla,

kdy dochází k impulsně generovaným úderům kyvadlového kladívka. Způsobené vibrace jsou pak měřeny tenzometry. Opotřebenění lze zjistit také využitím kolísání otáček vřetene, které vzniká prostřednictvím oscilace řezné rychlosti. Na základě charakteristických projevů v signále lze identifikovat především lom nástroje [10].

Měření zvuku

Zvuk může být měřen pomocí akcelerometru nebo mikrofonu umístěného v blízkosti hřbetu nástroje. Akcelerometr snímá zvukové vibrace, které jsou následně rozděleny na vysoké a nízké a jejich poměr poskytuje informaci o opotřebenění nástroje. Mikrofon sbírá zvuky, které jsou vyhodnoceny pomocí spektrální analýzy. S růstem opotřebenění dochází na spektru ke vzniku nárůstků amplitud některých frekvencí [10].

Měření akustické emise

Spočívá ve vyhodnocování ultrazvukových povrchových napět'ových vln, které nesou informaci o procesu probíhající v kořeni třísky. Tato metoda je vhodná ke sledování stavu nástroje hlavně oblasti ultrazvuku, protože má široký frekvenční rozsah. Výhodou tohoto je eliminace vlivu okolního prostředí a vlastních kmitů stroje. Signál akustické emise je možné měřit v průběhu procesu obrábění. Tato metoda má předpoklady použití i ve výrobní praxi [10].

3 TECHNOLOGICKÉ VLIVY NA OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE

Jakost obrobené plochy a přesnost rozměrů je při obrábění ovlivněna řadou parametrů řezného procesu, jako jsou řezné podmínky, geometrie břitu nástroje, obráběný materiál, řezné prostředí a tuhost a pevnost systému stroj – nástroj – obrobek.

3.1 Řezné podmínky

Volba řezných podmínek je závislá na vlastnostech nástroje, obrobku i prostředí. Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi vzniká v místě řezu velké množství tepla a proto je při intenzivním obrábění nutné přivádět do místa řezu dostatečné množství chladicí kapaliny. Tato kapalina odvádí část tepla, zároveň snižuje tření v místě řezu a také odplavuje vzniklé třísky.

Při volbě řezných podmínek je nutné nejprve stanovit hloubku záběru, následně je určena hodnota posuvu, která závisí na požadované jakosti obrobené plochy. Posuv se vždy volí co největší, tak aby vyhovoval daným kritériím. Dále jsou voleny řezné rychlosti, které jsou závislé hlavně na druhu obráběného i nástrojového materiálu a na způsobu obrábění. Zpravidla se nejnížší řezné rychlosti volí pro obrábění legovaných ocelí, vyšší pro obrábění nelegovaných uhlíkových ocelí a litiny. Vysoké řezné rychlosti se pak používají například pro obrábění hliníku a jeho slitin [13].

3.2 Obrobitelnost materiálu

Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu. Lze ji definovat jako míru schopnosti materiálu být zpracován některou z metod obrábění. Obrobitelnost ovlivňuje i volba řezných podmínek pro funkci nástroje při všech metodách obrábění. Obrobitelnost závisí na několika faktorech, nejdůležitější jsou:

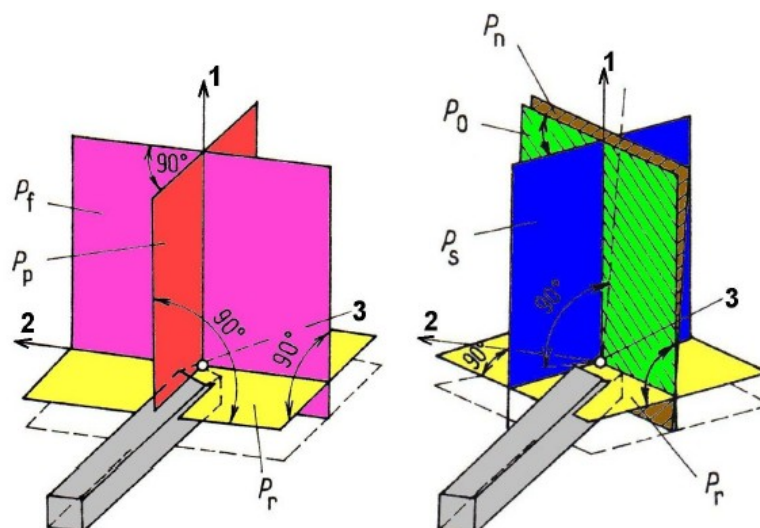
- způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- metoda obrábění,
- řezné podmínky,

- řezné prostředí,
- geometrie nástroje,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu [11].

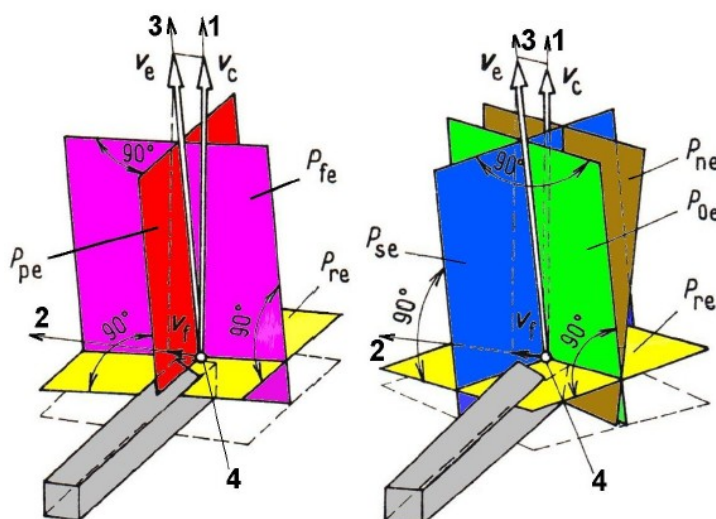
Z hlediska charakteristik lze obrobiteľnosť rozdeliť na absolútnej a relatívnej. Absolútnej obrobiteľnosť je charakterizovaná buď funkčným vzťahom a spolu súvisiacimi parametrami alebo veľkosťou danej veličiny, ktorá charakterizuje obrobiteľnosť. Relatívnej obrobiteľnosť je charakterizovaná bezrozmernými číslami, ktoré udávajú pomer veľkosti určitej veličiny vzťahujúcej sa k danému materiálu obrobku a veľkosti tejto veličiny odpovedajúcej referenčnému materiálu obrobku [14]. Kritériom pre srovnávanie je napríklad teplota rezania, tvorba třísky, veľkosť rezných síl, štruktúra povrchu obrobku alebo najčastejšie veľkosť rezných rýchlostí. Pre vyhodnocovanie obrobiteľnosti sú technické konštrukčné materiály rozdelené na litiny, oceli, ťažké neželezné kovy (meď a slitiny meďi), ľahké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku), plastické hmoty, prírodné nerostné hmoty, vrstvené hmoty, pryže a tvrdené litiny pre výrobu valcov. Vyhodnocovanie prebieha tak, že je vždy vybraný jeden materiál, ktorý slouží ako etalon a k tomuto materiálu je potom stanovovaná relatívnej obrobiteľnosť ostatných materiálov celej skupiny [11].

3.3 Geometrie nástroje

Geometrie rezného nástroje má značný vliv na veľkosť rezných síl a jej rozloženie do jednotlivých zložiek, na utváranie a odvod třísky, drsnosť, presnosť a kvalitu výslednej obrobených ploch, trvanlivosť brúty a hospodárnosť obrábacieho procesu. Pre identifikáciu úhlů rezných častí nástroje sú definované dve súradnicové soustavy - nástrojová a pracovná. Nástrojová súradnicová soustava (statická) vychádza z predpokladaného smeru hlavného rezného pohybu a ze smeru posuvu. Má uplatnenie zejména pri konštrukcii, výrobe, kontrole a ostrení nástroje. Pracovná súradnicová soustava, jinak nazývaná ako efektívnej alebo kinetická, vychádza ze smeru výsledného rezného pohybu. Používa sa pre stanovenie geometrie rezného nástroje. Označenie oboch rovin je totožné, s tým rozdielom, že u pracovných rovin sa k označeniu pridáva index *e* [15].



Obrázek 17 – Roviny nástrojové souřadnicové soustavy, 1 – předpokládaný směr hlavního pohybu, 2 – směr posuvového pohybu, 3 – uvažovaný bod ostří [11]



Obrázek 18 – Roviny pracovní souřadnicové soustavy, 1 – směr hlavního pohybu, 2 – směr posuvového pohybu, 3 – směr řezného pohybu, 4 – uvažovaný bod ostří [11]

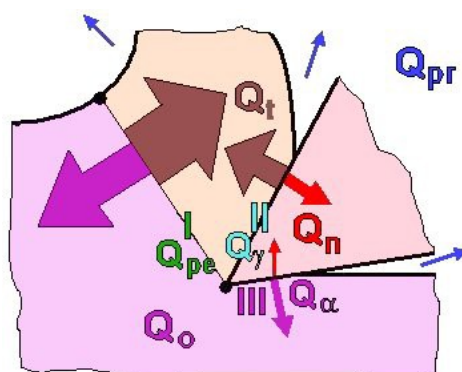
3.4 Teplota řezání

Teplota řezání je jedním z nejdůležitějších parametrů, které ovlivňují proces řezání. Závisí na ní možnosti a vhodnost požití různých řezných rychlostí, posuvů, hloubky řezu a také ovlivňuje trvanlivost nástroje [1, 11, 14].

Tepelná bilance řezného procesu

Při obrábění se téměř veškerá práce řezání mění na teplo. Teplo řezného procesu Q_e , které vzniká při odebrání určitého množství materiálu, je přibližně rovné práci

řezného procesu E_c . Vzniklé teplo negativně působí na řezné vlastnosti nástroje, ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu, přechování a zpevňování obráběného materiálu a také podmínky tření na čele i hřbetě nástroje [1, 11, 14].



Obrázek 19 – Vnik a šíření tepla v zóně řezání [1]

Teplo při obrábění vzniká v oblasti primární plastické deformace I (Q_{pe} - v důsledku plastických a elastických deformací), v oblasti sekundární plastické deformace II (Q_γ - v důsledku tření mezi čelem nástroje a třískou) a v oblasti III (Q_α - v důsledku tření hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku). Vzniklé teplo je odváděno třískou (Q_t), nástrojem (Q_n), obrobkem (Q_o) a řezným prostředím (Q_{pr}) (obrázek 19). Teplo, které vzniká v oblasti hřbetu, by mělo být co nejnižší, proto je třeba volit úhel hřbetu co největší a předejít tak výraznému opotřebení hřbetu [1, 11, 14].

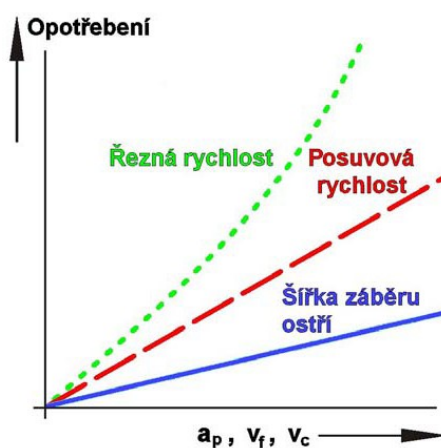
Podíl jednotlivých složek tepla odváděného třískou, obrobkem, nástrojem a prostředím, závisí na tepelné vodivosti materiálů, na řezných podmínkách, řezném prostředí a na geometrii břitu. Celkové množství vzniklého tepla lze měřit pomocí kalorimetrů [1, 11, 14].

3.5 Řezné prostředí

Prostředí v zóně řezání má významný vliv na kvantitativní, kvalitativní a ekonomické parametry řezného procesu. Řezné prostředí je tvořeno řeznými médii, jako jsou procesní pasty, kapaliny, plyny a mlhy. Všechna tato média musí mít chladicí, mazací a čistící účinek [11].

4 MOŽNOSTI SNIŽOVÁNÍ OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE

Opotřebení nástroje je normálním fyzikálním jevem a zabránit mu je prakticky nemožné. Lze ho snížit volbou vhodných parametrů. Existuje několik způsobů jak jednotlivým druhům opotřebení předejít nebo oddálit jejich nástup. [8] Mezi hlavní parametry, které ovlivňují opotřebení břitů, patří řezná rychlost, rychlost posuvu a hloubka řezu [16].



Obrázek 20 – Závislost opotřebení na řezné rychlosti, rychlosti posuvu a hloubce řezu [11]

Další možností snižování opotřebení řezného nástroje může být volba proměnné hloubky řezu. Na rozdíl od konstantní hloubky řezu, která je nejpoužívanější při hrubovacích cyklech, kde dochází k opotřebení nástroje na stejném místě břitů, proměnná hloubka řezu opotřebovává břit rovnoměrně [17].

4.1 Hrubování se snižováním hloubky řezu

Jedná se o hrubování, při kterém je s každým následujícím řezem snížena hloubka řezu. Se snižováním hloubky řezu se mění i místo opotřebení na břit nástroje. U tohoto typu hrubování roste časová náročnost se zmenšujícím se průměrem obráběného materiálu. To ovšem kompenzuje snižování opotřebení nástroje a tím jeho vyšší trvanlivost [17].

4.2 Hrubování s vytvářením kuželové plochy

Při tomto typu hrubování je jedním řezem vytvářena kuželová plocha, která začíná na největší hloubce řezu. S posuvem nástroje se hloubka řezu postupně snižuje. Druhým

řezem nástroj vytváří rovnoběžnou plochu s osou obrobku, kdy nástroj začíná na hloubce nejnižší a s posuvem nástroje odstraňuje vytvořenou kuželovou plochu z předešlého řezu a dostává se na nejvyšší hloubku řezu. Nástroj je rovnoměrně opotřebováván dle hloubky řezu [17].

4.3 Hrubování s nelineární hloubkou řezu

Hrubování prvním řezem mění dráhu nástroje a vytváří vlnovitý profil. Druhý řez probíhá již rovnoběžně s obrobkem, kdy je odstraňován vlnovitý profil vzniklý prvním řezem. U obou řezů je nástroj opotřebováván v závislosti na proměnné hloubce řezu. Tato metoda klade vysoké nároky na obráběcí stroj [17].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentu bylo analyzovat opotřebení VBD při hrubovacím soustružení a následně na základě měření vyhodnotit nejefektivnější způsob procesu hrubování. Princip experimentu spočíval ve změně podmínek obrábění, jako jsou hloubka řezu (konstantní a proměnná) a řezná rychlost (220 a 250 m/min). Měření bylo provedeno v laboratorii Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie na 4 vzorcích VBD od firmy Pramet.

5.1 Použitý materiál

Jako obráběný materiál byla zvolena nerezová austenitická chromo-niklová molybdenová ocel (1.4404). Dle ČSN 10088-1 1.4404 (X2CrNiMo 17-13-2). Již méně používané staré označení AISI 316L, ČSN 17 349. Tento materiál byl zvolen hlavně proto, že má při obrábění tendenci ke zpevňování za studena a je odolný proti korozi v průmyslovém prostředí, obzvláště proti mezikrystalové korozi. Ocel je hojně využívána v praxi v oblastech s vyšším korozním zatížením například v potravinářském nebo chemickém průmyslu. Chemické složení materiálu je v tabulce 1, mechanické vlastnosti v tabulce 2 [18, 19].

Tabulka 1 – Chemické složení materiálu 1.4404, upraveno dle [18]

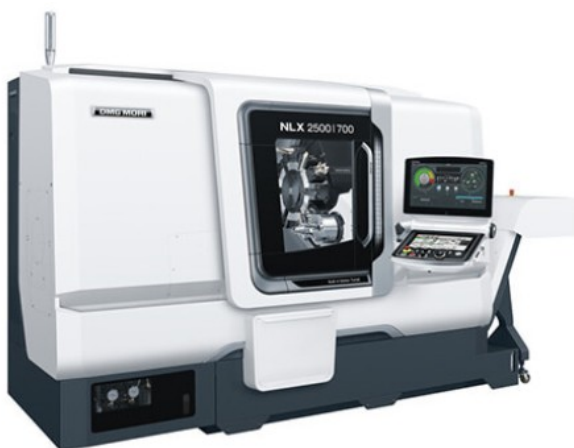
Materiál	Chemické složení [%]									
1.4404	C	Cr	Mn	Mo	N	Ni	S	Si	P	Fe
	0,00	16,50	0,00	2,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	zbytek
	– 0,03	– 18,50	– 2,00	– 2,50	– 0,10	– 13,00	– 0,015	– 1,00	– 0,045	

Tabulka 2 – Mechanické vlastnosti materiálu 1.4404, upraveno dle [18]

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Mez kluzu, $R_{p0,2}$	≥ 200	MPa
Mez pevnosti v tahu, R_m	500 – 700	MPa
Tažnost, A	≥ 40	%

5.2 Obráběcí stroj

Experiment byl prováděn na soustružnickém obráběcím centru DMG MORI NLX 2500MC/700. Obráběcí centrum je schopno realizovat navrhované testy soustružení, pro náš experiment je důležitý pohyb ve dvou osách.



Obrázek 21 – Soustružnické obráběcí centrum DMG MORI NLX 2500MC/700 [20]

Tabulka 3 – Základní parametry DMG MORI NLX 2500MC/700 [20]

Pracovní rozsah	Oběžný průměr nad ložiskem	787 mm
	Největší soustružená délka	705 mm
	Největší průměr obrobku	366 mm
	Rozsah délky osy X	795 mm
	Rozsah délky osy Z	260 mm
Vřeteno	Rozsah otáček	4000 ot/min
	Výkon vřetene	18,5 kW
Nástroje	Počet nástrojů	12
	Počet poháněných nástrojů	3
	Výkon poháněných nástrojů	5,5 kW
Posuvné pohony	Rychloposuv	30 000 mm/min
	NC koník	

5.3 Měření opotřebení

Měření opotřebení bylo prováděno na stereomikroskopu DM 143 FBGG (obrázek 22). Prostřednictvím počítače byly zaznamenávány jednotlivé snímky VBD. Každá VBD byla vložena do měřicího přípravku a snímána pro měření VB_{\max} . Technické parametry stereomikroskopu jsou v tabulce 4.



Obrázek 22 – Stereomikroskop DM 143 FBGG

Tabulka 4 – Technické parametry stereomikroskopu DM 143 FBGG

Zorná pole	s okuláry WF 10x / \varnothing 20 – 5 mm
Okulár	širokoúhlý WF 10x / 20 mm (2 ks)
Hlavice	biokulární s vestavenou kamerou, úhel vzhledu 45°, oční rozestup 54 – 76 mm, dioptrické doostření obou okulárů +/-5D, očnice, násuvný průměr hlavice 72 mm
Celkové zvětšení	10x – 40x
ZOOM	plynulý posuv 1x – 4x
Pracovní vzdálenost	bez předsádkového objektivu 80 mm
Stativ	tyčový, model FBGG, výška stativu, 420 mm, průměr tyčového ramene 32 mm, vzdálenost od středu podložení desky k rameni 144 mm, matová a černobílá podložná deska \varnothing 95 mm, modrý filtr s držákem – pro procházející světlo
Konfigurace čipu	CCD 1/3", rozlišení 640x480 pixelů, počet TV řádků 550, vyvážení bílé automaticky nebo manuálně
Rozměry přístroje	výška 420 mm, šířka 330 mm, hloubka 280 mm, hmotnost 6,5 kg
Stativ - zaostřování	hrubé – posuv držáku hlavice po tyči, jemné – makroposuv (pastorek hřebínek)
Stativ - stůl	rozměry 220 mm x 170 mm s pérovými držáky preparátu
Stativ - osvětlení	halogenové dopadající a procházející 12V/10W s plynulou regulací intenzity jasu, nezávislé zapínání – vrchní/spodní/obě

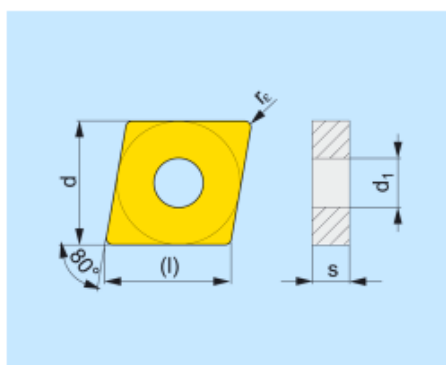
5.4 Použitý řezný nástroj

Pro experiment byly použity břitové destičky typu C ve tvaru kosočtverce od firmy Pramet – CNMG 120408E-SM T8330. Jedná se o VBD vhodné pro obrábění austenitických korozivzdorných materiálů. Materiál T8330 je submikronový substrát s vyšším obsahem kobaltu. PVD povlak zmírňuje vrubové opotřebení na hlavním břitu.

VBD je určena jak pro operace běžného soustružení, tak pro oblasti těžkého hrubování. Utvařec třísky typu SM je vhodný pro obrábění nerezových ocelí. Vzorky VBD byly poskytnuty Vysokou školou báňskou [21, 22].

Tabulka 5 – Technické vlastnosti břitové destičky CNMG 120408E-SM T8330

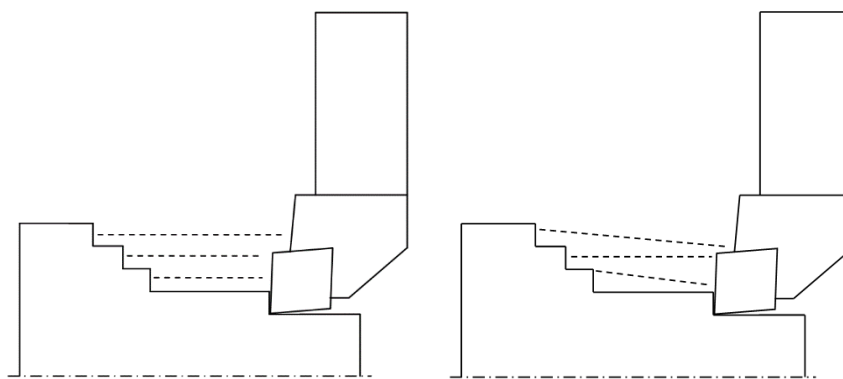
l (mm)	d (mm)	d1 (mm)	s (mm)	re (mm)	f _{min} (mm/ot)	f _{max} (mm/ot)	a _{pmin} (mm)	v _c (m/min)
12,90	12,70	5,16	4,76	0,80	0,20	0,45	0,80	100 – 150



Obrázek 23 – Břitová destička CNMG 120408E-SM T8330 [21]

5.5 Postup testování VBD

Pro rychlejší prokázání opotřebení byla zvolena vyšší řezná rychlost, než je uvedena výrobcem. Byly testovány 4 VBD. První dvě testování proběhla s konstantní hloubkou řezu a rozdílnou řeznou rychlostí (obrázek 24). Při hrubování konstantní hloubkou řezu dochází k opotřebení VBD v jenom místě břitu, jedná se o nejčastější způsob odebrání třísky při hrubování. Další dvě testování proběhla s proměnnou hloubkou řezu a rozdílnou řeznou rychlostí (obrázek 25). Jedná se o hrubování s vytvářením kuželové plochy, kdy první řez začíná na maximální hloubce řezu a plynule přechází do minimální stanovené hloubky řezu. Tím vzniká kuželová plocha, která je odstraněna při druhém řezu. Použité řezné podmínky udávají tabulky 6 a 7. V průběhu obrábění byly VBD po každém řezu snímány stereomikroskopem uvedeným v kapitole 5.3.



Obrázek 24 – Schéma hrubování s konstantní hloubkou řezu (vlevo) a s proměnnou hloubkou řezu (vpravo)

5.6 Opotřebení testovaných VBD

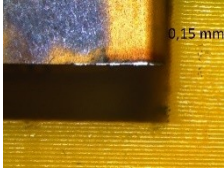

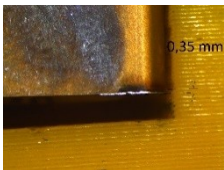



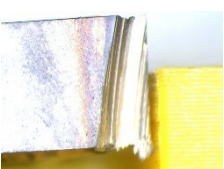
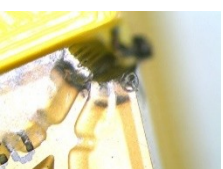
Tabulka 6 – Hrubování s konstantní hloubkou řezu a_p

číslo řezu	vstupní průměr	výstupní průměr	obráběná délka	hloubka řezu minimální	hloubka řezu maximální	posuv na otáčku	rychlost posuvu	řezná rychlost	otáčky	čas	celkový čas	objem odebraného materiálu	opotřebení
	ϕd_1	ϕd_2	L	a_{pmin}	a_{pmax}	f_{ot}	v_{fmin}	v_c	n	t_s	t	Q	VB_{max}
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/min	m/min	min	min	min	mm ³ /min	mm
VBD 1													
1	106	102	469,5	2	2	0,3	198,2	220	661	2,37	2,37	132	0,15
2	102	98	469,0	2	2	0,3	206,0	220	687	2,28	4,65	132	0,35
3	98	94	468,5	2	2	0,3	214,4	220	715	2,19	6,84	132	1,85
4	94	90	468,0	2	2	0,3	223,5	220	745	2,09	8,93	132	dest.
VBD 2													
1	90	86	467,5	2	2	0,3	265,3	250	884	1,76	1,76	150	0,17
2	86	82	467,0	2	2	0,3	277,6	250	925	1,68	3,44	150	0,41
3	82	78	466,5	2	2	0,3	291,1	250	970	1,60	5,04	150	dest.

Tabulka 7 – Hrubování s proměnnou hloubkou řezu a_p

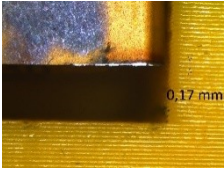

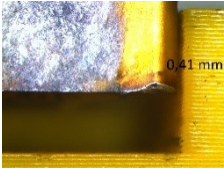



číslo řezu	vstupní průměr	výstupní průměr	obráběná délka	hloubka řezu minimální	hloubka řezu maximální	posuv na otáčku	rychlost posuvu	řezná rychlost	otáčky	čas	celkový čas	objem odebraného materiálu	opotřebení
	ϕd_1	ϕd_2	L	a_{pmin}	a_{pmax}	f_{ot}	v_{fmin}	v_c	n	t_s	t	Q	VB_{max}
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm/min	m/min	min	min	min	mm ³ /min	mm
VBD 3													
1	78	72	466	3	1	0,3	306,1	250	1 020	1,52	1,52	225	0,15
2	72	70	465,5	1	3	0,3	331,6	250	1 105	1,40	2,93	75	0,25
3	70	64	465	3	1	0,3	341,0	250	1 137	1,36	4,29	225	0,27
4	64	62	464,5	1	3	0,3	373,0	250	1 243	1,25	5,54	75	dest.
VBD 4													
1	62	56	464	3	1	0,3	338,8	220	1 129	1,37	1,37	198	0,1
2	56	54	463,5	1	3	0,3	375,2	220	1 251	1,24	2,60	66	0,14
3	54	48	463	3	1	0,3	389,0	220	1 297	1,19	3,79	198	0,17
4	48	46	462,5	1	3	0,3	437,7	220	1 459	1,06	4,85	66	0,19
5	46	40	462	3	1	0,3	456,7	220	1 522	1,01	5,86	198	0,21
6	40	38	461,5	1	3	0,3	525,2	220	1 751	0,88	6,74	66	0,23
7	38	32	461	3	1	0,3	552,9	220	1 843	0,83	7,58	198	0,25
8	32	30	460,5	1	3	0,3	656,5	220	2 188	0,70	8,28	66	0,31

Tabulka 8 – Měření opotřebení VBD 1

číslo řezu VBD 1	hloubka řezu a_p [mm]	řezná rychlost v_c [m/min]	čas t [min]	dráha nástroje l [mm]	snímek opotřebení VB_{max}	snímek opotřebení KB	velikost opotřebení VB_{max} [mm]
1	2	220	2,37	469,5			0,15
2	2	220	4,65	938,5			0,35
3	2	220	6,84	1407			1,85
4	2	220	8,93	1875			Destrukce VBD

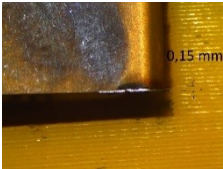

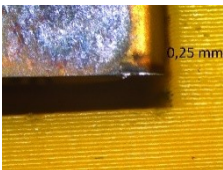

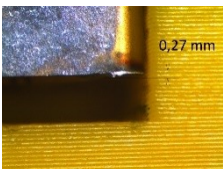
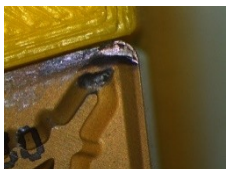
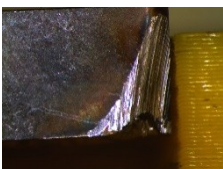

U VBD 1 byla zvolena rychlost řezu 220 m/min a konstantní hloubka řezu 2 mm. Testování VBD 1 vykazuje vysoký nárůst opotřebení při 3. řezu, kdy hodnota opotřebení dosáhla 1,85 mm. Na snímku je vidět opotřebení ve tvaru vrubu. Přestože je opotřebení vysoké, byl proveden i 4. řez, při kterém však došlo k destrukci VBD jak bylo očekáváno.

Tabulka 9 – Měření opotřebení VBD 2

číslo řezu VBD 2	hloubka řezu a_p [mm]	řezná rychlost v_c [m/min]	čas t [min]	dráha nástroje l [mm]	snímek opotřebení VB_{max}	snímek opotřebení KB	velikost opotřebení VB_{max} [mm]
1	2	250	1,76	467,5			0,17
2	2	250	3,44	934,5			0,41
3	2	250	5,04	1401			Destrukce VBD

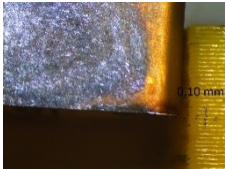

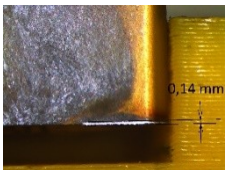



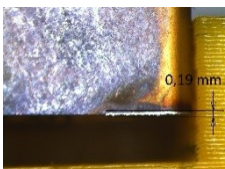

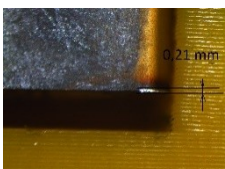

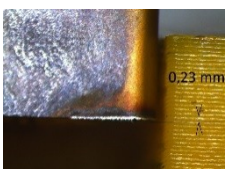

U VBD 2 byla zvýšena řezná rychlost na 250 m/min a ponechána konstantní hloubka řezu 2 mm. Při druhém řezu je hodnota opotřebení 0,41 mm a na snímku lze vidět začínající plastickou deformaci břitu. V průběhu 3. řezu došlo k destrukci destičky, přesto že hodnota opotřebení nebyla tak vysoká jako u VBD 1.

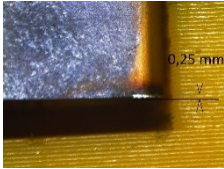

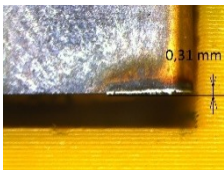

Tabulka 10 – Měření opotřebení VBD 3

číslo řezu VBD 3	hloubka řezu a_p [mm]	řezná rychlost v_c [m/min]	čas t [min]	dráha nástroje l [mm]	snímek opotřebení VB_{max}	snímek opotřebení KB	velikost opotřebení VB_{max} [mm]
1	3-1	250	1,52	466			0,15
2	1-3	250	2,93	931,5			0,25
3	3-1	250	4,29	1396,5			0,27
4	1-3	250	5,54	1861			Destrukce VBD

U VBD 3 byla zvolena rychlost řezu 250 m/min a proměnná hloubka řezu v rozmezí 1-3 mm. Kvůli různé hloubce řezu je opotřebení rozloženo rovnoměrně po větší části břitu. U 3. řezu je hodnota opotřebení rovna 0,27 mm. Přestože opotřebení nebylo vysoké, u 4. řezu došlo k destrukci destičky, což je následkem vyšší řezné rychlosti.

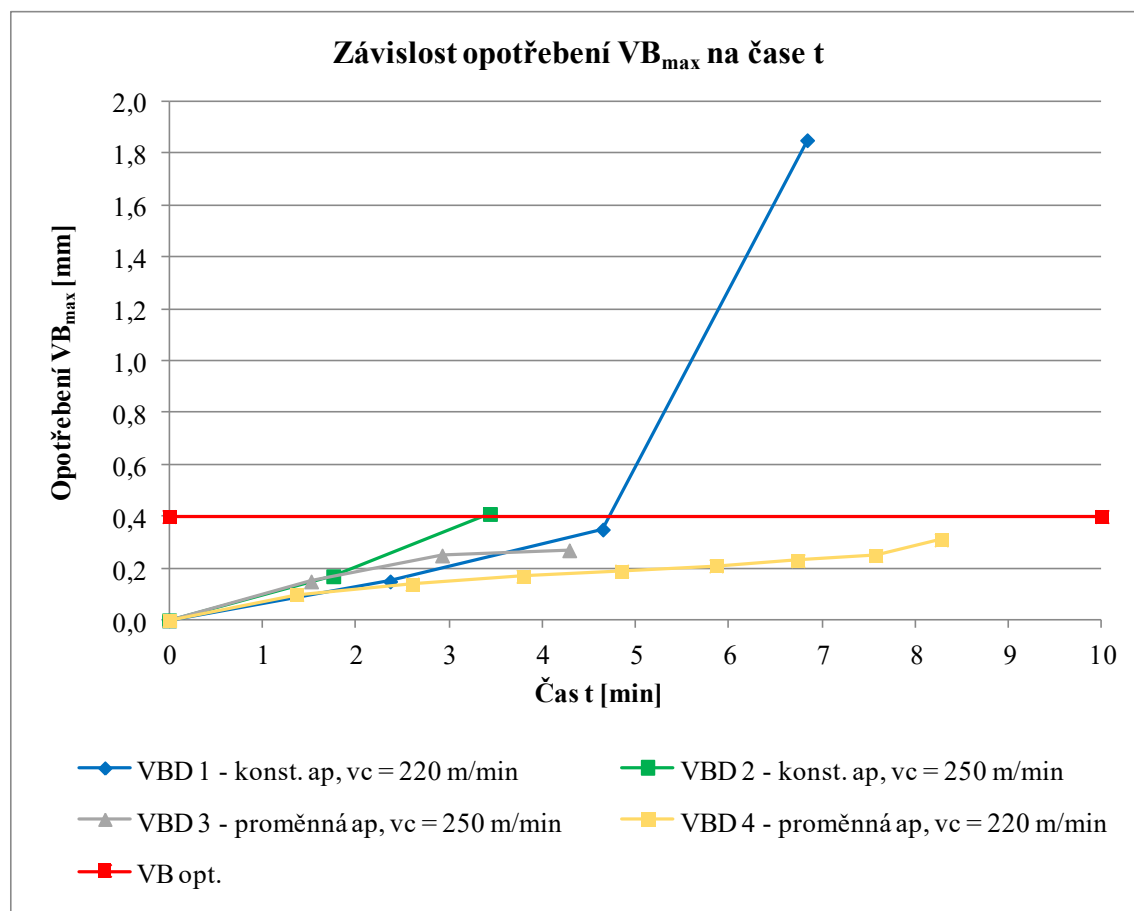
Tabulka 11 – Měření opotřebení VBD 4

číslo řezu VBD 4	hloubka řezu a_p [mm]	řezná rychlost v_c [m/min]	čas t [min]	dráha nástroje l [mm]	snímek opotřebení VB_{max}	snímek opotřebení KB	velikost opotřebení VB_{max} [mm]
1	3-1	220	1,37	464			0,10
2	1-3	220	2,60	927,5			0,14
3	3-1	220	3,79	1390,5			0,17
4	1-3	220	4,85	1853			0,19
5	3-1	220	5,86	2315			0,21
6	1-3	220	6,74	2776,5			0,23

7	3-1	220	7,58	3237,5			0,25
8	1-3	220	8,28	3698			0,31

U VBD 4 byla řezná rychlost na 220 m/min a proměnná hloubka řezu v rozmezí 1-3 mm. Experiment byl ukončen operátorem po 8. řezu z důvodu bezpečnosti, protože zbylý materiál již nebylo možné dál obrábět. Nicméně hodnota opotřebení při 8. řezu dosáhla 0,31 mm a k destrukci destičky nedošlo.

5.7 Vyhodnocení opotřebení VBD



Obrázek 25 – Graf závislosti opotřebení na čase u jednotlivých VBD

Na obrázku 25 je graf závislosti maximálního opotřebení na čase u jednotlivých VBD. Bylo zvoleno kritérium opotřebení 0,4 mm. Z grafu lze vidět, že u všech VBD zpočátku dochází k nárůstu opotřebení, což je způsobeno velkým měrným tlakem z důvodu malé stykové plochy neopotřebovaného nástroje s obráběným povrchem.

U VBD 1 je počáteční nárůst opotřebení nejmírnější, v čase 2,37 min je hodnota opotřebení rovna 0,15 mm. Při 3. řezu došlo k náhlému zvýšení opotřebení a zároveň bylo překročeno stanovené kritérium optimálního opotřebení. Toto opotřebení ve tvaru vrubu vyústilo v destrukci VBD při 4 řezu.

VBD 2, u které byla zvýšena řezná rychlost, měla nejvyšší nárůst opotřebení v nejkratším čase. Zvolené kritérium optimálního opotřebení bylo překročeno už při 2. řezu, kdy byla v čase 3,44 min hodnota opotřebení 0,41 mm. Při testování VBD 2 došlo ke vzniku plastické deformace břitu a následně při 3. řezu k destrukci VBD.

VBD 3 se zvýšenou řeznou rychlostí a proměnnou hloubku řezu měla zpočátku podobný nárůst opotřebení jako VBD 2, kdy byla hodnota opotřebení po 1. řezu rovna 0,15 mm. Další měření ukazuje, že s rostoucím časem dochází k minimálnímu opotřebení VBD. V čase 4,29 min byla hodnota opotřebení 0,27 mm. Při 4. řezu, kdy dráha nástroje vedla z minimální hloubky řezu do maximální, byla VBD zničena.

Z grafu je na první pohled patrné, že VBD 4 měla nejlepší výsledky opotřebení v závislosti na čase. V čase 1,37 min bylo opotřebení 0,1 mm. Při dalších řezech opotřebení rostlo plynule, až do hodnoty 0,31 mm naměřené v čase 8,28 min. Na rozdíl od ostatních testovaných destiček zde nedošlo v důsledku opotřebení k destrukci.

U VBD 2 a VBD 3, kde byla zvolena vyšší řezná rychlost, došlo k výraznějšímu nárůstu počátečního opotřebení a také k dřívější destrukci VBD než u destiček s nižší řeznou rychlostí.

Z grafu lze také vidět, že na opotřebení VBD má vliv i hloubka řezu. U VBD 1 a VBD 2, které měly konstantní hloubku řezu je opotřebení ve stejném čase vyšší než u VBD 3 a VBD 4, kde byla zvolena proměnná hloubka řezu. Graf ukazuje, že VBD 3 a VBD 4 s proměnnou hloubkou řezu mají nárůst opotřebení pozvolnější, avšak na opotřebení má vliv také řezná rychlost. Jak lze vidět u VBD 3, se zvýšenou řeznou rychlostí 250 m/min, dochází k rychlejšímu opotřebení než u VBD 4 kde byla rychlost 220 m/min.

6 Závěr

Při obrábění dochází v důsledku řezného procesu ke kontaktu nástroje s obrobkem a odcházející třískou, což vede k opotřebení nástroje. Proces opotřebení nástroje je velmi složitý děj, který závisí na mnoha faktorech. Mezi hlavní parametry, které ovlivňují opotřebení břitů, patří řezná rychlost, rychlost posuvu a hloubka řezu.

Cílem bakalářské práce bylo najít možnosti snižování opotřebení při podélném hrubovacím soustružení. Pro experiment byly zvoleny dvě strategie hrubování. Hrubování za konstantní hloubky řezu a za proměnné hloubky řezu s vytvářením kuželové plochy. U obou strategií byly zvoleny řezné rychlosti 220 a 250 m/min. Experiment se prováděl na čtyřech výměnných břitových destičkách typu C. Jako obráběný materiál byla zvolena nerezová austenitická chromo-niklová molybdenová ocel (1.4404).

Na základě měření bylo zjištěno, že u VBD 1, kde byla zvolena rychlost řezu 220 m/min a konstantní hloubka řezu, došlo k náhlému zvýšení opotřebení a zároveň bylo překročeno stanovené kritérium optimálního opotřebení. V důsledku toho vzniklo opotřebení ve tvaru vrubu, které vyústilo v destrukci VBD. U VBD 2, s konstantní hloubkou řezu, u které byla zvýšena řezná rychlost na 250 m/min, byl nejrychlejší nárůst opotřebení v závislosti na čase. VBD 3 se zvýšenou řeznou rychlostí a proměnnou hloubkou řezu měla zpočátku rychlejší nárůst opotřebení. Další měření však ukázalo, že s rostoucím časem dochází k minimálnímu zvyšování opotřebení VBD. VBD 4 měla nejnižší opotřebení v závislosti na čase. Experiment prokázal, že na opotřebení má vliv i způsob hrubování. U VBD s konstantní hloubkou řezu bylo opotřebení ve stejném čase vyšší než u VBD s proměnnou hloubkou řezu. Přestože VBD s proměnnou hloubkou řezu mají prokazatelně nižší opotřebení v závislosti na čase, než VBD s konstantní hloubkou řezu, závisí opotřebení i na zvolené řezné rychlosti.

Z experimentu vyplývá, že proměnná hloubka řezu je jednou z možností snižování opotřebení nástroje při hrubovacím soustružení.

Poděkování

Rád bych chtěl tímto poděkovat doc. Ing. Markovi Sadílkovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a cenné rady při řešení bakalářské práce.

7 Seznam použité literatury

- [1] FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK.
Experimentální metody. Brno, 2019. Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/he1_experimentalni_metody_cviceni_2019_forejt_piska_humar_janicek.pdf
- [2] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. Úvod do teorie obrábění: 4 Opotřebení řezných nástrojů. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2013. ISBN 978-80-248-3013-1.
- [3] Opotřebení strojních soustav a vznik poruch [online]. In: . [cit. 2020-05-03].
Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/4kapitola.pdf>
- [4] MÁDL, Jan, Jindřich KAFKA, Martin VRABEC a Rudolf DVOŘÁK.
Technologie obrábění. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999.
ISBN 978-80-01-03752-2.
- [5] FUSEK, Martin a Ludmila ADÁMKOVÁ. Únava materiálu: Křehký lom, základní mechanické vlastnosti materiálu. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2013.
ISBN 978-80-248-3024-7.
- [6] Příručka obrábění: Pramet [online]. In: . [cit. 2020-05-03]. Dostupné z:
http://stachura.cz/novy/data/prirucka_obrazeni_pramet.pdf
- [7] Opotřebení břitů [online]. In: . [cit. 2020-05-03]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>
- [8] Příručka pro technology: Opotřebení se nevyhneme. In: MM Spektrum: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [9] Druhy opotřebení břitů [online]. In: . [cit. 2020-05-03]. Dostupné z:
http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrazeni_321.pdf

- [10] Měření opotřebení nástrojů [online]. In: . [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: http://home1.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf
- [11] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část. Brno, 2003. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [12] JAROŠ, Aleš. Nové frézovací nástroje z rychlořezné oceli pro hrubovací operace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015. ISBN 978-80-214-5229-9. Ph.D. Thesis. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] Technologie III - Obrábění: Řezné podmínky při obrábění [online]. In: . [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: http://www.kom.tul.cz/soubory/tob_rp.pdf
- [14] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP a Lenka PETŘKOVSKÁ. Technologie II: 1. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007-2008. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [15] SADÍLEK, Marek a Jaroslav DUBSKÝ. Obrábění I: výběr přednášek. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3857-1.
- [16] Jak zvýšit životnost nástroje při soustružení [online]. In: . [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-improve-tool-life-in-turning.aspx>
- [17] SADÍLEK, M., J. DUBSKÝ, Z. SADÍLKOVÁ a Z. PORUBA. Cutting forces during turning with variable depth of cut. Perspectives in Science. 2016, 7, 357-363. DOI: 10.1016/j.pisc.2015.11.055.
- [18] Přehled materiálů. Kipp [online]. [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Slu%C5%BEby/P%C5%99ehled-materi%C3%A1l%C5%AF/nerezov%C3%A1-ocel/pid.1097.1108.1244.8092.8202/1-4404-Edelstahl.html>
- [19] INOX, spol. s r. o. - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL: NEREZOVÁ OCEL 1.4404 [online]. In: . [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>

- [20] NLX 2500 [online]. In: . [cit. 2020-05-13]. Dostupné z:
<https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/soustruzeni/univerzalni-soustruzeni/nlx/nlx-2500>
- [21] Pramet e-cat [online]. In: . [cit. 2020-05-10]. Dostupné z:
<http://ecat.pramet.com/insertsGrid.aspx>
- [22] Dormer Pramet [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z:
<https://www.dormerpramet.com/cs-cz/productssite/pages/turning.aspx>

8 Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 – Mechanismy opotřebení: 1 – abraze, 2 – difúze, 3 – oxidace, 4 – křehký lom, 5 – adheze [2]</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2 – Klasifikace typů opotřebení [2]</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 3 – Opotřebení na hřbetu nástroje [2]</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 4 – Opotřebení ve tvaru žlábků [2]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 5 – Vydrolení ostří nástroje [2]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 6 – Plastická deformace bříty [2]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 7 – Opotřebení ve tvaru vrubu [2]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 8 – Tvorba nárůstku na hřbetě [2]</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 9 – Vznik hřebenovitých trhlin [10]</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 10 – Únavový lom [10]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 11 – Lom bříty nástroje [2]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 12 – Formy opotřebení dle ISO 3685 [2]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 13 – Časová závislost opotřebení pro různé řezné rychlosti (křivka pro nejmenší řeznou rychlost v_{cl}) [11]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 14 – Příklad opotřebení na hřbetě nástroje [2]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 15 – Schéma měření optickou metodou [2]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 16 – Osvětlení čela nástroje [10]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 17 – Roviny nástrojové souřadnicové soustavy, 1 – předpokládaný směr hlavního pohybu, 2 – směr posuvového pohybu, 3 – uvažovaný bod ostří [11]</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 18 – Roviny pracovní souřadnicové soustavy, 1 – směr hlavního pohybu, 2 – směr posuvového pohybu, 3 – směr řezného pohybu, 4 – uvažovaný bod ostří [11]</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 19 – Vnik a šíření tepla v zóně řezání [1]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 20 – Závislost opotřebení na řezné rychlosti, rychlosti posuvu a hloubce řezu [11]</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 21 – Soustružnické obráběcí centrum DMG MORI NLX 2500MC/700 [20] ...</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 22 – Stereomikroskop DM 143 FBGG</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 23 – Břitová destička CNMG 120408E-SM T8330 [21]</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 24 – Schéma hrubování s konstantní hloubkou řezu (vlevo) a s proměnnou hloubkou řezu (vpravo)</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 25 – Graf závislosti opotřebení na čase u jednotlivých VBD</i>	<i>42</i>

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Chemické složení materiálu 1.4404, upraveno dle [18]	32
Tabulka 2 – Mechanické vlastnosti materiálu 1.4404, upraveno dle [18]	32
Tabulka 3 – Základní parametry DMG MORI NLX 2500MC/700 [20]	33
Tabulka 4 – Technické parametry stereomikroskopu DM 143 FBGG	34
Tabulka 5 – Technické vlastnosti břitové destičky CNMG 120408E-SM T8330	35
Tabulka 6 – Hrubování s konstantní hloubkou řezu a_p	36
Tabulka 7 – Hrubování s proměnnou hloubkou řezu a_p	37
Tabulka 8 – Měření opotřebení VBD 1	38
Tabulka 9 – Měření opotřebení VBD 2	39
Tabulka 10 – Měření opotřebení VBD 3	40
Tabulka 11 – Měření opotřebení VBD 4	41